

М.Г. ПАНТЕЛЯТ, Ю.С. ГРИЩУК, О.О. ЧЕПЕЛЮК, А.К. ЄЛОЄВ

СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ МУЛЬТИФІЗИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ІНДУКЦІЙНИХ КУХОННИХ ПЛИТ

Індукційні плити являють собою відносно новий клас сучасної електропобутової техніки – кухонні електричні плити, які розігрівають металевий посуд вихровими струмами, які створюються електромагнітним полем частотою 20-100 кГц. Представляє значний інтерес дослідження мультифізичних (електромагнітних, теплових і механічних) процесів, що протікають в індукційних плитах в процесі їх експлуатації, а також розробка методики розрахунку і проектування їх конструктивних елементів. Отримані результати мають бути розраховані на використання в практиці конструювання побутових індукційних плит, а також у навчальному процесі для підготовки фахівців за відповідною навчальною програмою. Кількість опублікованих робіт, присвячених комп'ютерному моделюванню процесів в індукційних кухонних плитах, на багато порядків менше, ніж кількість публікацій з питань добре розвинутого чисельного аналізу мультифізичних явищ у промислових індукційних нагрівачах. У статті наведено огляд і аналіз публікацій, головним чином опублікованих у закордонних виданнях, присвячених мультифізичному комп'ютерному моделюванню електромагнітних і теплових процесів і явищ в індукційних кухонних плитах і посуді, що нагрівається. Запропоновані напрямки подальших досліджень: доцільно врахувати при застосуванні метода скінчених елементів залежності електрофізичних та теплофізичних властивостей матеріалів від температури, а також нелінійні магнітні властивості (основні криві намагніченості) ферромагнітних матеріалів. Математичне моделювання розподілу зв'язаних полів доцільно розпочати у двовимірній постановці (значно більш складна тривимірна постановка та відповідне програмне забезпечення можуть бути використані пізніше для уточнення отриманих результатів).

Ключові слова: індукційні плити, мультифізичні процеси, комп'ютерне моделювання, індукційні нагрівачі, огляд і аналіз публікацій, напрямки подальших досліджень.

М.Г. ПАНТЕЛЯТ, Ю.С. ГРИЩУК, А.А. ЧЕПЕЛЮК, А.К. ЕЛОЕВ

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ МУЛЬТИФИЗИЧНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ИНДУКЦИОННЫХ КУХОННЫХ ПЛИТ

Индукционные плиты представляют собой относительно новый класс современной электробытовой техники – кухонные электрические плиты, которые разогревают металлическую посуду вихревыми токами, создаваемыми электромагнитным полем частотой 20-100 кГц. Представляет значительный интерес исследование мультифизических (электромагнитных, тепловых и механических) процессов, протекающих в индукционных плитах в процессе их эксплуатации, а также разработка методики расчета и проектирования их конструктивных элементов. Полученные результаты должны быть рассчитаны на использование в практике конструирования бытовых индукционных плит, а также в учебном процессе для подготовки специалистов по соответствующей учебной программе. Количество опубликованных работ, посвященных компьютерному моделированию процессов в индукционных кухонных плитах, на много порядков меньше, чем количество публикаций по вопросам хорошо развитого численного анализа мультифизических явлений в промышленных индукционных нагревателях. В статье приведен обзор и анализ публикаций, главным образом опубликованных в зарубежных изданиях, посвященных мультифизическому компьютерному моделированию электромагнитных и тепловых процессов и явлений в индукционных кухонных плитах и нагреваемой посуде. Предложены направления дальнейших исследований: целесообразно учесть при применении метода конечных элементов зависимости электрофизических и теплофизических свойств от температуры, а также нелинейные магнитные свойства (основные кривые намагнитченности) ферромагнитных материалов. Математическое моделирование распределения связанных полей целесообразно начать в двумерной постановке (значительно более сложная трехмерная постановка и соответствующее программное обеспечение могут быть использованы позднее для уточнения полученных результатов).

Ключевые слова: индукционные плиты, мультифизические процессы, компьютерное моделирование, индукционные нагреватели, обзор и анализ публикаций, направления дальнейших исследований.

M.G. PANTELYAT, Yu.S. GRISHCHUK, A.A. CHEPELYUK, A.K. ELOEV

STATUS AND PERSPECTIVES OF THE MULTIPHYSICAL SIMULATION OF INDUCTION KITCHEN PLATES

Induction cookers are a relatively new class of modern electrical household appliances – kitchen electric stoves that heat metal dishes with eddy currents generated by an electromagnetic field with a frequency of 20-100 kHz. Of considerable interest is the study of multiphysical (electromagnetic, thermal, and mechanical) processes occurring in induction cookers during their operation, as well as the development of methods for calculating and designing their structural elements. The results obtained should be intended for use in the practice of designing domestic induction cookers, as well as in the educational process for training specialists in the relevant curriculum. The number of published papers devoted to computer simulation of processes in induction cookers is many orders of magnitude less than the number of publications on the issues of well-developed numerical analysis of multiphysical phenomena in industrial induction heaters. The paper presents a review and analysis of publications, mainly published abroad devoted to multiphysical computer modeling of electromagnetic and thermal processes and phenomena in induction cookers and heated dishes. The directions for further research have been proposed: it is advisable to take into account, when applying the finite element method, the dependencies of the electrophysical and thermal properties on temperature, as well as the nonlinear magnetic properties (main magnetization curves) of ferromagnetic materials. Mathematical modelling of the distribution of coupled fields should be started in a two-dimensional formulation (a much more complicated three-dimensional formulation and the corresponding software can be used later to refine the results).

Key words: induction cooker, multiphysical processes, computer simulation, induction heaters, review and analysis of publications, directions for further research.

Вступ. Індукційні плити являють собою відносно новий клас сучасної електропобутової техніки – кухонні електричні плити, які розігрівають металевий посуд вихровими струмами, які створюються електромагнітним полем частотою 20-100 кГц [1]. Конст-

рукції сучасних індукційних плит різних виробників наведені на рис. 1. Основним вузлом індукційної кухонної плити є індуктор – плоска одновиткова або багатовиткова котушка, при протіканні по якій змінного струму створюється електромагнітне поле, яке

© М.Г. Пантелят, Ю.С. Грищук, О.О. Чепелюк, А.К. Єлоєв, 2018

індуктує в свою чергу вихрові струми в посуді, що нагрівається. Конструкція індуктора індукційної плити представлена на рис. 2.

Представляє значний інтерес дослідження мультифізичних (електромагнітних, теплових і механічних) процесів, що протікають в індукційних плитах в процесі їх експлуатації, а також розробка методики розрахунку і проектування їх конструктивних елементів. Отримані результати мають бути розраховані для використання в практиці конструювання побутових індукційних плит, а також у навчальному процесі для підготовки фахівців за відповідною навчальною програмою.



Рис. 1. Сучасні індукційні кухонні плити

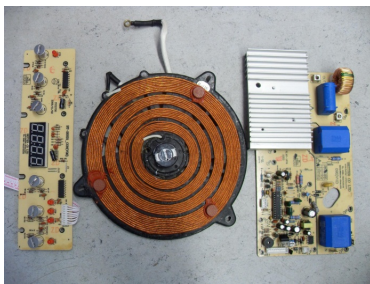


Рис. 2. Плоский багатовитковий індуктор індукційної плити

Дослідження надзвичайно складних з фізичної та математичної точки зору мультифізичних електромагнітних, теплових і механічних явищ, що мають місце в процесі роботи індукційних кухонних плит, можливо проводити лише з використанням сучасних методів комп'ютерного моделювання (чисельних методів). При цьому, потрібно враховувати їх взаємний вплив одне на інше, що дозволить отримати найбільш достовірні результати розрахунків.

Кількість опублікованих робіт, присвячених комп'ютерному моделюванню процесів в індукційних кухонних плитах, на багато порядків менше, ніж кількість публікацій з питань добре розвинутого чисельного аналізу мультифізичних явищ у промислових індукційних нагрівачах (лише деякі з тисяч публікацій наведені, наприклад, у [2]). В останні роки інтерес науковців до дослідження саме індукційних кухонних плит безперервно зростає, кількість відповідних наукових праць зростає, підвищується складність математичних моделей і чисельних методів, що використовуються для виконання розрахунків.

Мета роботи – огляд і аналіз публікацій,

присвячених мультифізичному комп'ютерному моделюванню процесів і явищ в індукційних кухонних плитах, і визначення напрямків подальших досліджень.

Огляд літературних джерел та аналіз стану проблеми. У вітчизняній науково-технічній літературі наразі не знайдено робіт, присвячених розробці та реалізації інженерних та чисельних методик розрахунку та проектування індукційних кухонних плит, за винятком публікацій досліджень кафедри електричних апаратів НТУ «ХПІ» [1, 3-7]. У закордонних виданнях відповідних публікацій теж небагато. Розглянемо найбільш цікаві з них.

У роботах [8-10] запропоновано методику спільного чисельного аналізу процесів в електронних схемах генераторів високої частоти та розподілу електромагнітного поля в індукторній системі індукційної кухонної плити, що дозволило авторам запропонувати, розрахувати та експериментально перевірити цікаву новітню конструкцію індуктора плити (рис. 3). Комп'ютерне моделювання розподілу електромагнітного поля виконується методом скінчених елементів у двовимірній [8, 9] та тривимірній [10] постановках. Двовимірна та тривимірна розрахункові моделі, створені для виконання електромагнітних розрахунків, наведені відповідно на рис. 4, 5 [9, 10]. На рис. 6 наведені приклади отриманих результатів розрахунку електромагнітного поля при різних режимах роботи індукторної системи.

Недоліком робіт є відсутність аналізу теплових процесів у конструкції, що розглядається.

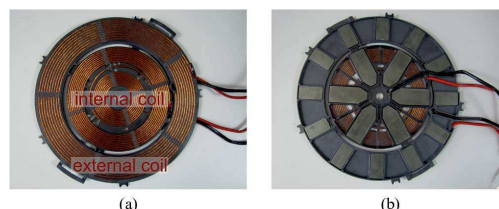


Рис. 3. Індукторна система індукційної кухонної плити з двома концентричними котушками та концентраторами електромагнітного поля [10]: а – вид зверху; б – вид знизу

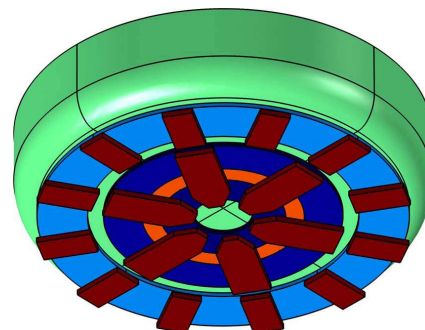


Рис. 4. Тривимірна модель індукторної системи з двома концентричними котушками, концентраторами електромагнітного поля та посудом, що нагрівається [10]

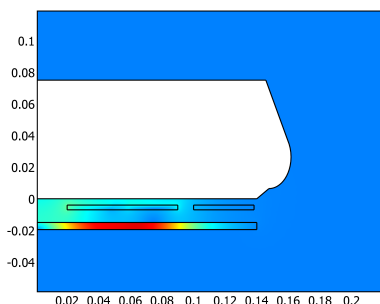


Рис. 5. Двовимірна розрахункова модель системи «дві концентричні котушки – посуд» для розрахунку розподілу електромагнітного поля [9]

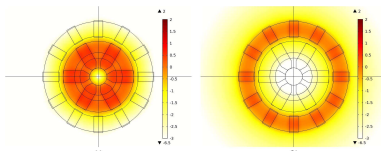


Рис. 6. Приклади результатів розрахунку розподілу електромагнітного поля [10]

У роботі [11] здійснено оптимізацію та виконано скінченоелементний аналіз у двовимірній постановці електромагнітних процесів (розподіл електромагнітного поля та електромагнітних сил) в індукційній кухонній плиті. Суттєвими недоліками використаної методики є розв'язання рівнянь електромагнітного поля у магнітостатичному наближенні (тобто знехтування вихровими струмами в першу чергу у посуді, що нагрівається), а також знехтування реальними магнітними властивостями матеріалів плити та посуду (всі матеріали вважаються немагнітними). Це не дозволяє отримати уяву про реальні процеси, що мають місце в процесі експлуатації індукційної кухонної плити. Крім того, при використанні вказаної постановки не може йти й мови про наступний аналіз теплових процесів у конструкції, що розглядається.

Автори роботи [12] розв'язали аналогічну задачу з використанням більш сучасного формулювання, аналогічного запропонованому в [3], що дозволило з використанням метода скінчених елементів (рис. 7) отримати детальний двовимірний розподіл амплітудних значень щільності вихрових струмів у запропонованій конструкції індукційної кухонної плити з індуктором у вигляді спіралі (рис. 8). Крім того, виконано розрахунок теплових втрат у плоскому індукторі плити, але не зроблено наступний крок – комп'ютерне моделювання теплового стану індуктора та посуду, що нагрівається.

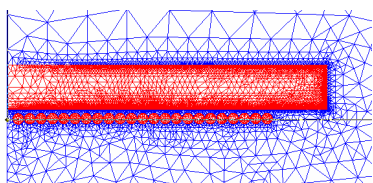


Рис. 7. Розрахункова модель системи «індуктор – посуд» з розбивкою на скінчені елементи для розрахунку розподілу електромагнітного поля [12]

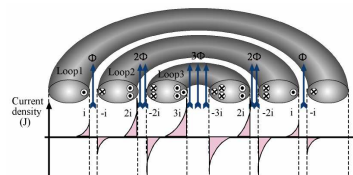


Рис. 8. Плоский спіральний індуктор індукційної кухонної плити [12]

Робота [13] присвячена розв'язанню задачі електромагнітної сумісності стосовно сучасного побутового обладнання, у тому числі побутових індукційних плит. Отже, виконується розрахунок електромагнітного поля у просторі, що оточує побутовий пристрій. При цьому використовується метод еквівалентного електромагнітного дипольного моменту. Таким чином, запропонована розрахункова методика не дозволяє отримати детальний розподіл електромагнітного та, тим більше, температурного поля в конструктивних елементах побутових плит та посуду, що нагрівається.

У статті [14] запропоновано використати метод скінчених елементів для розв'язання зв'язаних двовимірних задач розрахунку нестационарного електромагнітного поля у комплексній формі та стаціонарного теплового поля посуду, що нагрівається. На рис. 9 наведено ескіз розрахункової моделі системи «індуктор – посуд», а на рис. 10, 11 – запропонована авторами конструкція та її розрахункова модель з відповідними геометричними розмірами. Результати розрахунку просторового розподілу температури в посуді, що нагрівається, наведені на рис. 12.

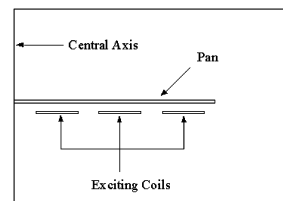


Рис. 9. Ескіз двовимірної розрахункової моделі системи «індуктор – посуд» [14]

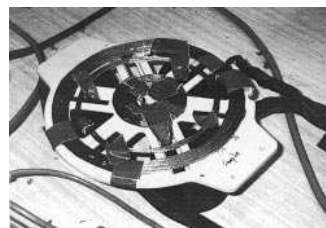


Рис. 10. Виготовлений індуктор індукційної кухонної плити [14]

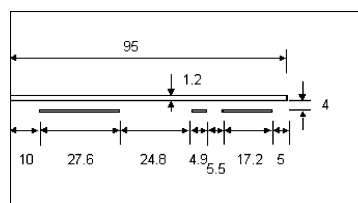


Рис. 11. Двовимірна розрахункова модель системи «індуктор – посуд» з виготовленою котушкою [14]

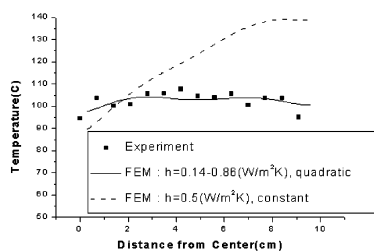


Рис. 12. Температурне поле посуду, що нагрівається [14]

Недоліками роботи [14] є:

– розв'язання саме стаціонарного рівняння теплопровідності, в той час як температура посуду в процесі нагрівання суттєво змінюється не лише у просторі, а також у часі

– запропонована методика не використовується для розрахунку теплового стану конструктивних елементів індукційної кухонної плити (індуктора та магнітопроводу); наявність магнітопроводу в конструкції плити навіть не враховується

– автори роботи не враховують залежності електрофізичних та теплофізичних властивостей матеріалів від температури, а також нехтують суттєво нелінійними магнітними властивостями феромагнітних матеріалів посуду та магнітопроводу

В роботі [15] метод скінчених елементів використовується для комп'ютерного моделювання розподілу тривимірного електромагнітного поля запропонованої конструкції індукційної кухонної плити (рис. 13). На рис. 14 наведена відповідна розрахункова модель, а на рис. 15 – отриманий розподіл індукції магнітного поля плити. Теплове поле конструкції розрахунковим шляхом не досліджується, хоча відповідні експериментальні дослідження виконані (рис. 16).



Рис. 13. Запропонована конструкція індукційної кухонної плити [15]



Рис. 14. Тривимірна розрахункова модель запропонованої конструкції індукційної кухонної плити [15]

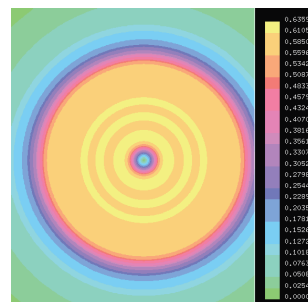


Рис. 15. Розподіл індукції магнітного поля запропонованої конструкції індукційної кухонної плити [15]

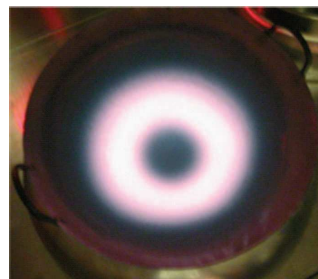


Рис. 16. Температурне поле посуду, що нагрівається (результати експериментальних досліджень) [15]

У статті [16] метод скінчених елементів використано для комп'ютерного аналізу зв'язаних тривимірних електромагнітного та нестационарного теплового полів у запропонованій авторами конструкції індукційної кухонної плити (рис. 17). Враховано залежності теплофізичних властивостей матеріалів від температури. На рис. 18 наведено приклад розрахованого розподілу щільності вихрових струмів у системі «індуктор – посуд».

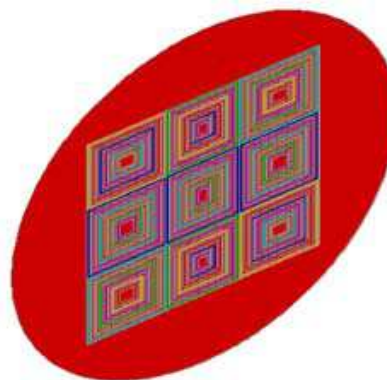


Рис. 17. Тривимірна розрахункова модель запропонованої конструкції індукційної кухонної плити з 9 ідентичними прямокутними котушками [16]

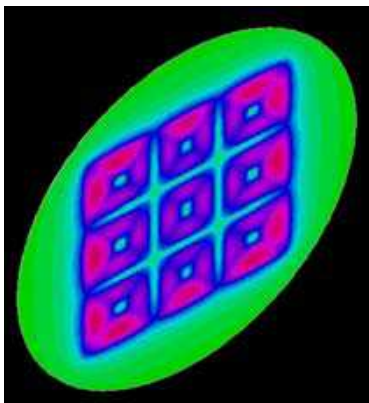


Рис. 18. Розподіл щільності вихрових струмів у запропонованій конструкції індукційної кухонної плити [16]

Недоліки роботи:

– не враховано залежності електрофізичних властивостей матеріалів від температури, а також суттєво нелінійні магнітні властивостями феромагнітних матеріалів;

– не розглядається феромагнітний магнітопровід індукційної плити.

Вибір напрямку досліджень. Для досягнення мети роботи доцільно розвинути методику, викладену в роботі [16], а саме врахувати при застосуванні метода скінчених елементів залежність електрофізичних та теплофізичних властивостей матеріалів від температури, а також нелінійні магнітні властивості (основні криві намагніченості) феромагнітних матеріалів. Математичне моделювання розподілу зв'язаних полів доцільно розпочати у двовимірній постановці (значно більш складна тривимірна постановка та відповідне програмне забезпечення можуть бути використані пізніше для уточнення отриманих результатів).

Список літератури

1. Пантелія М.Г., Гуренцов Ю.В., Трофімов А.В. Методика розрахунку індукторів індукційних кухонних плит // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2014. – № 20 (1063). – С. 13-24.
2. Bajda Ye.I., Klymenko B.V., Pantelyat M.G., Trichet D., Wasselynck G. Electromagnetic and thermal transients during induction heating of cylindrical workpieces // Acta Technica. – 2018. – v. 63, No. 5 (accepted).
3. Пантелія М.Г., Гуренцов Ю.В. Методика комп'ютерного моделювання методом скінчених елементів розподілу електромагнітного поля індукційної кухонної плити // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2014. – № 41 (1084). – С. 16-24.
4. Пантелія М.Г., Трофімов А.В. Методика скінченоеlementного аналізу теплового стану індукційної кухонної плити та посуду, що нагрівається // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2015. – № 13 (1122). – С. 36-44.
5. Пантелія М.Г., Трофімов А.В. Методика мультифізичного аналізу електромагнітних і теплових процесів в індукційній кухонній плиті та посуді, що нагрівається // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2015. – № 42 (1151). – С. 3-7.
6. Пантелія М.Г., Гуренцов Ю.В. Скінченоеlementний аналіз розподілу електромагнітного поля індукційної кухонної плити // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення

7. електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2016. – № 32 (1204). – С. 32-36.
7. Пантелія М.Г., Єлєєв А.К. Скінченоеlementний аналіз розподілу температурного поля посуду, що нагрівається на індукційній кухонній плиті // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2017. – № 34 (1256). – С. 26-28.
8. Carretero C., Lucia O., Acero J., Bordio J.M., Alonso R. Passive network equivalent of an induction system for domestic cookers application based on FEA tool simulation // Proceedings of the 26th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). – 6-11 March 2011, Fort Worth, Texas, USA. – 2011. – P. 1753-1758.
9. Carretero C., Lucia O., Acero J., Bordio J.M. FEA tool based model of partly coupled coils used in domestic induction cookers // Proceedings of the 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2011). – 7-10 November 2011, Melbourne, Victoria, Australia. – 2011. – P. 2533-2538.
10. Carretero C., Lucia O., Acero J., Bordio J.M. Computational modeling of two partly coupled coils supplied by a double half-bridge resonant inverter for induction heating appliances // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2013. – v. 60, No. 8. – P. 3092-3105.
11. Hosseini S.H., Kashtiban A.M., Alizadeh G. Particle swarm optimization and finite-element based approach for induction heating cooker design // Proceedings of the SICE-ICASE International Joint Conference. – 18-21 October 2006, Busan, Korea. – 2006. – P. 4624-4627.
12. Hediello M., Akhbari M. New approach in design of planar coil of induction cooker based on skin and proximity effect analysis // Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). – 10-13 February 2009, Churchill, Victoria, Australia. – 2009. – P. 1100-1105.
13. Yamazaki K., Kawamoto T., Fujinami H., Shigemitsu T. Equivalent dipole moment method to characterize magnetic field generated by electric appliances: extension to intermediate frequencies of up to 100 kHz // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2004. – v. 46, No. 1. – P. 115-120.
14. Jin-Kyu Byun, Kyung Choi, Hee-Sue Roh, Song-yop Hahn. Optimal design procedure for a practical induction heating cooker appliances // IEEE Transactions on Magnetics. – 2000. – v. 36, No. 4. – P. 1390-1393.
15. Meng L.C., Cheng K.W.E., Chan K.W. Heating performance improvement and field study of the induction cooker // Proceedings of the 3rd International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA). – 20-22 May 2009, Hong Kong. – 2009. – P. 313-317.
16. Meng L.C., Cheng K.W.E., Luk P.C.K. Field analysis of an induction cooker with square 9-coil system by applying diverse exciting pattern // Proceedings of the 6th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2012). – 27-29 March 2012, Bristol, United Kingdom. – 2012. – P. 1-5.

References (transliterated)

1. Panteliat M.H., Hurentsov Yu.V., Trofimov A.V. Metodyka rozrakhunku induktoriv induktsiinykh kukhonnykh plyt. Visnyk NTU "KhPI". Seriya: Problemy udoskonalennia elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriia i praktyka. – Kh.: NTU "KhPI", 2014. 20 (1063). P. 13-24.
2. Bajda Ye.I., Klymenko B.V., Pantelyat M.G., Trichet D., Wasselynck G. Electromagnetic and thermal transients during induction heating of cylindrical workpieces. Acta Technica. 2018. v. 63, No. 5 (accepted).
3. Panteliat M.H., Hurentsov Yu.V. Metodyka komp'uternoho modeliuvannia metodom skinchennykh elementiv rozpodilu elektromagnitnoho polia induktsiinoi kukhonnoi plyty. Visnyk NTU "KhPI". Seriya: Problemy udoskonalennia elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriia i praktyka. Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. 41 (1084). P. 16-24.
4. Panteliat M.H., Trofimov A.V. Metodyka skinchenelementnoho analizu teplovoho stanu induktsiinoi kukhonnoi plyty ta posudu, shcho nahrivaetsia. Visnyk NTU "KhPI". Seriya: Problemy udoskonalennia elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriia i praktyka. Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. 13 (1122). P. 36-44.
5. Panteliat M.H., Trofimov A.V. Metodyka multifizychnoho analizu

- електромagnetnykh i teplovykh protsesiv v induktsiini kukhonni plyty ta posudi, shcho nahrivaietsia. Visnyk NTU "KhPI". Seriya: Problemy udoskonalennia elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriia i praktyka. Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. 42 (1151). P. 3-7.
6. *Panteliat M.H., Hurentsov Yu.V.* Skinchenoelementnyi analiz rozpodilu elektromagnetnoho polia induktsiinoi kukhonnoi plyty. Visnyk NTU "KhPI". Seriya: Problemy udoskonalennia elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriia i praktyka. Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. № 32 (1204). P. 32-36.
 7. *Panteliat M.H., Yeloiev A.K.* Skinchenoelementnyi analiz rozpodilu temperaturnoho polia posudu, shcho nahrivaietsia na induktsiini kukhonni plyty. Visnyk NTU "KhPI". Seriya: Problemy udoskonalennia elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriia i praktyka. Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. 34 (1256). P. 26-28.
 8. *Carretero C., Lucia O., Acero J., Bordio J.M., Alonso R.* Passive network equivalent of an induction system for domestic cookers application based on FEA tool simulation. Proceedings of the 26th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). 6-11 March 2011, Fort Worth, Texas, USA. 2011. P. 1753-1758.
 9. *Carretero C., Lucia O., Acero J., Bordio J.M.* FEA tool based model of partly coupled coils used in domestic induction cookers. Proceedings of the 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2011). 7-10 November 2011, Melbourne, Victoria, Australia. 2011. P. 2533-2538.
 10. *Carretero C., Lucia O., Acero J., Bordio J.M.* Computational modeling of two partly coupled coils supplied by a double half-bridge resonant inverter for induction heating appliances. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2013. v. 60, No. 8. P. 3092-3105.
 11. *Hosseini S.H., Kashtiban A.M., Alizadeh G.* Particle swarm optimization and finite-element based approach for induction heating cooker design. Proceedings of the SICE-ICASE International Joint Conference. 18-21 October 2006, Busan, Korea. 2006. P. 4624-4627.
 12. *Hediehloo M., Akhbari M.* New approach in design of planar coil of induction cooker based on skin and proximity effect analysis. Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). 10-13 February 2009, Churchill, Victoria, Australia. 2009. P. 1100-1105.
 13. *Yamazaki K., Kawamoto T., Fujinami H., Shigemitsu T.* Equivalent dipole moment method to characterize magnetic field generated by electric appliances: extension to intermediate frequencies of up to 100 kHz. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2004. v. 46, No. 1. P. 115-120.
 14. *Jin-Kyu Byun, Kyung Choi, Hee-Suce Roh, Song-yop Hahn.* Optimal design procedure for a practical induction heating cooker appliances. IEEE Transactions on Magnetics. 2000. v. 36, No. 4. P. 1390-1393.
 15. *Meng L.C., Cheng K.W.E., Chan K.W.* Heating performance improvement and field study of the induction cooker. Proceedings of the 3rd International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA). 20-22 May 2009, Hong Kong. 2009. P. 313-317.
 16. *Meng L.C., Cheng K.W.E., Luk P.C.K.* Field analysis of an induction cooker with square 9-coil system by applying diverse exciting pattern. Proceedings of the 6th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2012). 27-29 March 2012, Bristol, United Kingdom. 2012. P. 1-5.

Надійшло (received) 09.10.18

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the authors

Пантелейт Михайло Гаррійович (Пантелейт Михаил Гарриевич, Pantelyat Michael Garrievich) – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри електричних апаратів, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1357-2134>; e-mail: m150462@yahoo.com.

Гришук Юрій Степанович (Гришук Юрий Степанович, Grischuk Yuri Stepanovich) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", професор кафедри електричних апаратів, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7427-5419>; e-mail: grischuk-kpi@ukr.net.

Чепелюк Олександр Олександрович (Чепелюк Александр Александрович, Chepelyuk Oleksandr Oleksandrovych) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних апаратів, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4522-9821>; e-mail: chep1@i.ua.

Єлоєв Алан Казбекович (Елоев Алан Казбекович, Yeloyev Alan Kazbekovich) – аспірант, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", м. Харків; e-mail: mauser98kar@gmail.com.